

走行車両の質量測定

小川 勇治* 小寺 忠**

Mass Measurement of Moving Vehicles

Yuji OGAWA and Tadashi KOTERA

(Received Feb. 29, 2000)

In this paper, the measurement method of the mass of moving vehicles is described. If a moving vehicle does not rest on the measurement platform, and if it passes at some constant rate, dynamic signals are obtained by the vibration of a moving vehicle. The theory which estimates the mass from such dynamic signals is shown. This method based on equation of motion of the a vibration system is more brief than that based on the state equation of a control system. If the estimation of the mass of the moving vehicle is not done by the on-line, it has no meaning for the practical use. Also experiments of the on-line measurement are carried out, and good results are obtained.

Key Words : Mass Measurement, Moving Vehicle, Vibration Theory

1. まえがき

大型トラックの積載物の料金をその重さで課するような場合、大型トラックを計測台の上で停止させて測定すればよいが、それでは大型の計測台が必要なだけでなく、計測に時間がかかり渋滞を引き起こすことになる。渋滞を防ぐために大型トラックは計測台の上で停止させることなく低速で通過させると、動荷重しか測定できない。そして、小型の計測台を使用すると、全体の動荷重すら計測できない。このような場合、前輪と後輪が別々に計測台を通過した時の動荷重の測定値から実際の荷重を推定することが極めて重要になってくる。

車両全体が載るようなトラックスケールについては、池田¹⁾らがすでに多変数制御理論に基づいた測定方法を提案している。しかし、制御理論に基づいているため理論が余りにも複雑であるだけでなく、車両全体が載る場合しか取り扱っていないため、前輪と後輪の軸重を別々に測定する場合

* 技術部 **機械工学科

については適用できない。

そこで本論文では、短い計測台の上を前輪と後輪が別々に通過するような場合の、多変数制御理論に依らない測定方法の原理を簡単にまとめている。すなわち、多自由度振動系の理論を用いて簡単にまとめている。

2. 二輪車の場合の運動方程式

計測台の振動が無視できないような場合の取り扱う系のモデルを図1に示す。座標の原点は、車両、計測台のそれぞれの静止平衡位置とする。ただし、

- Gは車両の重心
- Aは前輪、Bは後輪
- m：車両の質量
- J：車両の重心回りの慣性モーメント
- x：重心の変位
- θ ：重心回りの回転角度
- ℓ ：前後の車軸間距離
- ℓ_1 ：重心と後輪との距離
- ℓ_2 ：重心と前輪との距離
- k_2, c_2 ：前輪部分のばね定数と粘性減衰係数
- k_3, c_3 ：後輪部分のばね定数と粘性減衰係数
- m_A, m_B ：前輪、後輪の質量
- m_1 ：計測台の質量
- k_1 ：計測台の支持部分のばね定数
- c_1 ：計測台の支持部分の粘性減衰係数

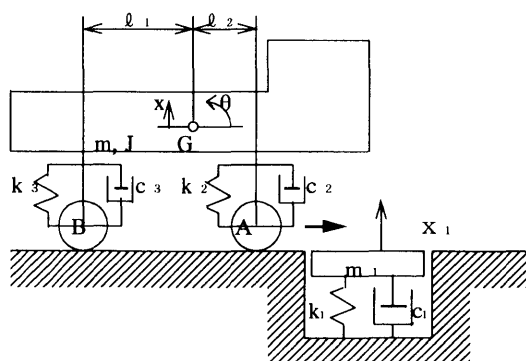


Fig. 1 Model of system

車両が任意の速度で走行して、前輪が計測台に乗った後の運動方程式は

$$\begin{aligned}
 (m_1 + m_A) \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2) x_1 \\
 - c_2 (\dot{x} + \ell_2 \dot{\theta}) - k_2 (x + \ell_2 \theta) = - \left(\frac{\ell_1}{\ell} m + m_A \right) g \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$m\ddot{x} + c_2(\dot{x} + \ell_2\dot{\theta}) + k_2(x + \ell_2\theta) - c_2\dot{x}_1 - k_2x_1 + c_3(\dot{x} - \ell_1\dot{\theta}) + k_3(x - \ell_1\theta) = 0 \quad (2)$$

$$J\ddot{\theta} + \ell_2c_2(\dot{x} + \ell_2\dot{\theta}) + \ell_2k_2(x + \ell_2\theta) - \ell_2c_2\dot{x}_1 - \ell_2k_2x_1 - \ell_1c_3(\dot{x} - \ell_1\dot{\theta}) - \ell_1k_3(x - \ell_1\theta) = 0 \quad (3)$$

のようになる。

計測台の変位 x_1 の記録から、 $(\frac{\ell}{\ell}m + m_A)g$ を推定することが目的となる。

いま

$$M = \begin{bmatrix} m_1 + m_A & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & J \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & -c_2\ell_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & c_2\ell_2 - c_3\ell_1 \\ -c_2\ell_2 & c_2\ell_2 - c_3\ell_1 & \ell_2^2c_2 + \ell_1^2c_3 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & -c_2\ell_2 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & c_2\ell_2 - c_3\ell_1 \\ -c_2\ell_2 & c_2\ell_2 - c_3\ell_1 & \ell_2^2c_2 + \ell_1^2c_3 \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x \\ \theta \end{bmatrix}$$

と表すと、運動方程式は

$$M\ddot{\mathbf{x}} + C\dot{\mathbf{x}} + K\mathbf{x} = -(\frac{\ell}{\ell}m + m_A)g \quad (4)$$

となる。ただし、 $\mathbf{g} = \begin{bmatrix} g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$

この特殊解は次のように与えられる。

$$\mathbf{x} = -(\frac{\ell}{\ell}m + m_A)K^{-1}\mathbf{g}$$

成分で表せば

$$(k_1 + k_2)x_1 - k_2(x + \ell_2\theta) = -(\frac{\ell}{\ell}m + m_A)g \quad (5)$$

$$k_2(x + \ell_2\theta) - k_2x_1 + k_3(x - \ell_1\theta) = 0 \quad (6)$$

$$\ell_2k_2(x + \ell_2\theta) - \ell_2k_2x_1 - \ell_1k_3(x - \ell_1\theta) = 0 \quad (7)$$

式(5)+(6) より

$$k_1x_1 + k_3(x - \ell_1\theta) = -(\frac{\ell}{\ell}m + m_A)g \quad (8)$$

式(6) $\times \ell_2$ -(7) より

$$\ell k_3(x - \ell_1\theta) = 0 \quad (9)$$

よって、

$$x_1 = -\frac{1}{k_1}(\frac{\ell}{\ell}m + m_A)g \quad (10)$$

となる。これ以外の特殊解は求める必要はない。

今の系は3自由度系になるので、式(1)に対応する同次微分方程式の解を

$$\mathbf{x} = e^{\lambda t} \mathbf{a} \quad (11)$$

と置くことにより、特性方程式

$$|\lambda^2 \mathbf{M} + \lambda \mathbf{C} + \mathbf{K}| = 0 \quad (12)$$

は λ の6次方程式となり、特性解 λ は一般に3組の共役複素数となる。ただし、今の課題の場合、 λ の具体的な形は不明であるし、求める必要もない。とりあえず、それらを $\lambda_i (i=1, \dots, 6)$ と置いておく。

すると、 x_1 の一般解は

$$x_1 = \sum_{i=1}^6 A_i e^{\lambda_i t} - \frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g \quad (13)$$

のようになる。この計測台の変位 x_1 の記録から、 $(\frac{\ell}{\ell} m + m_A) g$ を推定することが目的である。

3. 推定方法

車両が計測台に載ってからのある時刻 $t = t_0$ (これを時間の原点 $t = 0$ としてもよい)から、一定時間間隔 T ごとに変位 x_i を検出するものとする。それらを

$$x_{10} = \sum_{i=1}^6 A_i e^{\lambda_i t_0} - \frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g \quad (14)_0$$

$$x_{11} = \sum_{i=1}^6 A_i e^{\lambda_i (t_0+T)} - \frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g \quad (14)_1$$

$$x_{12} = \sum_{i=1}^6 A_i e^{\lambda_i (t_0+2T)} - \frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g \quad (14)_2$$

.....

$$x_{16} = \sum_{i=1}^6 A_i e^{\lambda_i (t_0+6T)} - \frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g \quad (14)_6$$

とおいてみる。もし仮に、すべての i について

$$a_0 + a_1 e^{\lambda_1 T} + a_2 e^{2\lambda_1 T} + \dots + a_5 e^{5\lambda_1 T} + e^{6\lambda_1 T} = 0 \quad (15)$$

とするような定数 $a_n (n=0, 1, \dots, 5)$ が存在すれば、

$$\begin{aligned} & a_0 x_{10} + a_1 x_{11} + \dots + a_5 x_{15} + x_{16} \\ &= -\frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g (a_0 + a_1 + \dots + a_5 + 1) \end{aligned} \quad (16)$$

となり、定数 a_n さえ求まれば

$$\left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g = -k_1 \frac{a_0 x_{10} + a_1 x_{11} + \dots + a_5 x_{15} + x_{16}}{a_0 + a_1 + \dots + a_5 + 1} \quad (17)$$

のようになる。

したがって、定数 a_n の求め方が問題となる。

変位を検出し始める時刻を順次 T ずつずらせると、式(16)と同様に

$$\begin{aligned} & a_0 x_{11} + a_1 x_{12} + \dots + a_5 x_{16} + x_{17} \\ &= -\frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g (a_0 + a_1 + \dots + a_5 + 1) \end{aligned} \quad (16)_1$$

$$\begin{aligned} & a_0 x_{12} + a_1 x_{13} + \dots + a_5 x_{17} + x_{18} \\ &= -\frac{1}{k_1} \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A \right) g (a_0 + a_1 + \dots + a_5 + 1) \end{aligned} \quad (16)_2$$

が得られる。右辺は同じ定数であるので、順次引き算をすれば

$$a_0(x_{11}-x_{10})+a_1(x_{12}-x_{11})+\cdots+a_5(x_{16}-x_{15})+(x_{17}-x_{16})=0 \quad (18)_0$$

$$a_0(x_{12}-x_{11})+a_1(x_{13}-x_{12})+\cdots+a_5(x_{17}-x_{16})+(x_{18}-x_{17})=0 \quad (18)_1$$

.....

となる。ここで、()内は測定された変位の差であって既知である。未知数は6個であるので、このような式を6個作れば

$$\begin{bmatrix} d_0 & d_1 & d_2 & \cdots & d_5 \\ d_1 & d_2 & d_3 & \cdots & d_6 \\ & & \cdots & & \\ d_5 & d_6 & d_7 & \cdots & d_{10} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ a_5 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} d_6 \\ d_7 \\ \cdot \\ d_{11} \end{bmatrix} \quad (19)$$

なる連立方程式が得られる。ただし、 $d_i = x_{i+1} - x_{i1}$ とする。

したがって、変位のデータを合計13個求めれば、定数 a_n が求められ、式(17)から

$$\left(\frac{l}{l}\right)^1 m + m_A) g$$

を求めることができる。

同様に、後輪が計測台に乗った後の運動のデータから

$$\left(\frac{l}{l}\right)^2 m + m_B) g$$

を求めることができる。

従って、両者を加えることによって車両の全重量 $(m + m_A + m_B) g$ が得られる。

4. 力検出の場合

以上は計測台の下のパネが動く場合であったが、大きなロードセルを用いれば、変位 x_1 はほとんど無視でき、荷重そのものが検出される。この場合は、図2のように系は2自由度振動系となり、前輪が載ったときの運動方程式は

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c_2(\dot{x} + l_2\dot{\theta}) + k_2(x + l_2\theta) \\ + c_3(\dot{x} - l_1\dot{\theta}) + k_3(x - l_1\theta) = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} + l_2c_2(\dot{x} + l_2\dot{\theta}) + l_2k_2(x + l_2\theta) \\ - l_1c_3(\dot{x} - l_1\dot{\theta}) - l_1k_3(x - l_1\theta) = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

のようになり、計測台にかかる荷重 F は

$$F = \left(\frac{l}{l}\right)^1 m + m_A) g - k_2(x + l_2\theta) - c_2(\dot{x} + l_2\dot{\theta}) \quad (22)$$

で与えられる。

いまの場合、系は2自由度振動系であって、運動方程式は同次微分方程式であり、特性方程式は λ の4次方程式となり、特性解は一般に2組の共役複素数となる。やはり λ の具体的な形は不明であるし、求める必要もない。とりあえず、それらを λ_i ($i=1, \cdots, 4$)と置いておく。

すると、 x と θ の一般解は

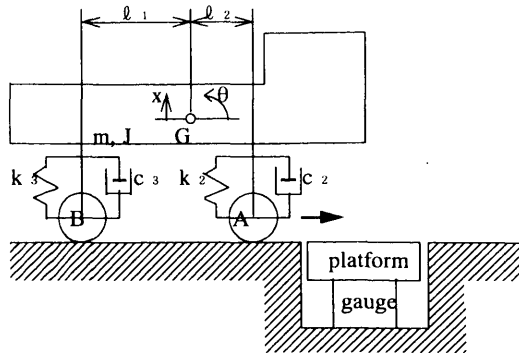


Fig. 2 Model of system

$$x = \sum_{i=1}^4 A_i e^{\lambda_i t} \quad (23)$$

$$\theta = \sum_{i=1}^4 B_i e^{\lambda_i t} \quad (24)$$

となる。これを荷重 F の式 (22) に代入したものを簡単のために

$$F = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\lambda_i t} + \left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g \quad (25)$$

とおく。この荷重の測定値から $\left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g$ を推定することが課題となる。推定方法は 3 と同様である。

車両が計測台に載ってからのある時刻 $t = t_0$ (これを時間の原点 $t = 0$ としてもよい) から、一定時間間隔 T ごとに荷重 F を検出するものとする。それらを

$$F_0 = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\lambda_i t_0} + \left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g \quad (26)_0$$

$$F_1 = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\lambda_i (t_0 + T)} + \left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g \quad (26)_1$$

$$F_2 = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\lambda_i (t_0 + 2T)} + \left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g \quad (26)_2$$

.....

$$F_4 = \sum_{i=1}^4 C_i e^{\lambda_i (t_0 + 4T)} + \left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g \quad (26)_4$$

とおいてみる。もし仮に、すべての i について

$$a_0 + a_1 e^{\lambda_i T} + a_2 e^{2\lambda_i T} + a_3 e^{3\lambda_i T} + e^{4\lambda_i T} = 0 \quad (27)$$

とするような定数 a_n ($n=0, 1, 2, 3$) が存在すれば、

$$\begin{aligned} & a_0 F_0 + a_1 F_1 + \cdots + a_3 F_3 + F_4 \\ &= \left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g (a_0 + a_1 + \cdots + a_3 + 1) \end{aligned} \quad (28)$$

となり、定数 a_n さえ求まれば

$$\left(\frac{l}{l} m + m_A\right) g = \frac{a_0 F_0 + a_1 F_1 + \cdots + a_3 F_3 + F_4}{a_0 + a_1 + \cdots + a_3 + 1} \quad (29)$$

のようになる。

荷重を検出し始める時刻を順次 T ずつずらせると、式 (28) と同様に

$$\begin{aligned} & a_0 F_1 + a_1 F_2 + \cdots + a_3 F_4 + F_5 \\ &= \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A\right) g (a_0 + a_1 + \cdots + a_3 + 1) \end{aligned} \quad (28)_1$$

$$\begin{aligned} & a_0 F_2 + a_1 F_3 + \cdots + a_3 F_5 + F_6 \\ &= \left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A\right) g (a_0 + a_1 + \cdots + a_3 + 1) \end{aligned} \quad (28)_2$$

.....

が得られる。右辺は同じ定数であるので、順次引き算をすれば

$$a_0 (F_1 - F_0) + a_1 (F_2 - F_1) + \cdots + a_3 (F_4 - F_3) + (F_5 - F_4) = 0 \quad (30)_0$$

$$a_0 (F_2 - F_1) + a_1 (F_3 - F_2) + \cdots + a_3 (F_5 - F_4) + (F_6 - F_5) = 0 \quad (30)_1$$

.....

となる。ここで、()内は測定された荷重の差であって既知である。未知数は4個であるので、このような式を4個作れば

$$\begin{pmatrix} d_0 & d_1 & d_2 & d_3 \\ d_1 & d_2 & d_3 & d_4 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_5 & d_6 & d_7 & d_8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ a_3 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} d_4 \\ d_5 \\ \cdot \\ d_7 \end{pmatrix} \quad (31)$$

なる連立方程式が得られる。ただし、 $d_i = F_{i+1} - F_i$ とする。

したがって、荷重のデータを合計9個求めれば、定数 a_n が求められ、式 (29) から

$$\left(\frac{\ell}{\ell} m + m_A\right) g$$

を求めることができる。

同様に、後輪が計測台に乗った後の荷重のデータから

$$\left(\frac{\ell}{\ell} m + m_B\right) g$$

が得られる。

5. 実験結果

実験では、提案した「多自由度振動系理論」により走行車両の質量を測定する。走行車両は、実験室規模の質量 $m=13.45\text{kg}$ 、モータ駆動バネ、ダッシュポット支持4輪車を用いた測定装置を試作し実験を行った。走行車両と測定台の諸元を表1に示す。

図3は、実験装置の系統図を示す。車両は、ロードセルを取り付けた測定台上を一定速度で走行する。走行車両の車輪が測定台

Table. 1 装置の諸元

Vehicle Mass	13.45 kg
Wheel Span	250 mm
Platform Length	200 mm

上に乗ってからの質量出力信号の時間経過は、パソコンで保存、処理され、両軸重より走行車両の質量が求められる。走行車両は、モータの回転速度を変えることにより任意の速度で走行することができる。

図4は、試作した走行車両が速度 0.43 m/sでの走行したときの質量出力信号の時間的変化を示す。図の左側の波形が走行前輪軸質量 (m_a) に対応し、右側の波形が走行後輪軸質量 (m_b) に対応するものである。図中の (↑) 印は、理論にある計測開始時刻 $t = t_0$ であり、(|) 印は、一定時間間隔 $T = 30\text{msec}$ での8点の位置を示す。後輪の場合も前輪と同様に9点の質量出力信号から、それぞれ軸

重が式(29)より求まり、 $m = m_a + m_b$ より走行車両質量 13.44kgが求まる。

図中右上は、一定時間間隔を変えたとき ($T = 10, 20, 30\text{ msec}$) の質量測定結果で、いずれも車両質量の $\pm 1\%$ 以内の誤

差にあり多自由度振動系理論による走行車両の質量測定の有効性及び妥当性が証明された。

6. 結言

以上のように、前輪軸、後輪軸の荷重を別々に計測することによって、走行車両の全質量を比較的簡単に求めることができる。

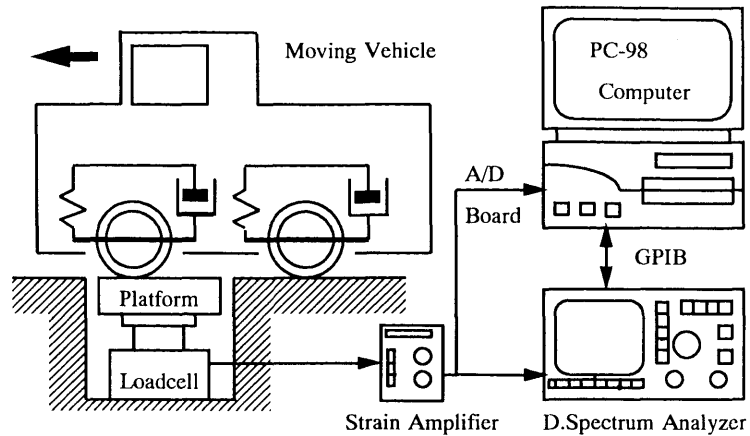


Fig. 3 実験装置の系統図

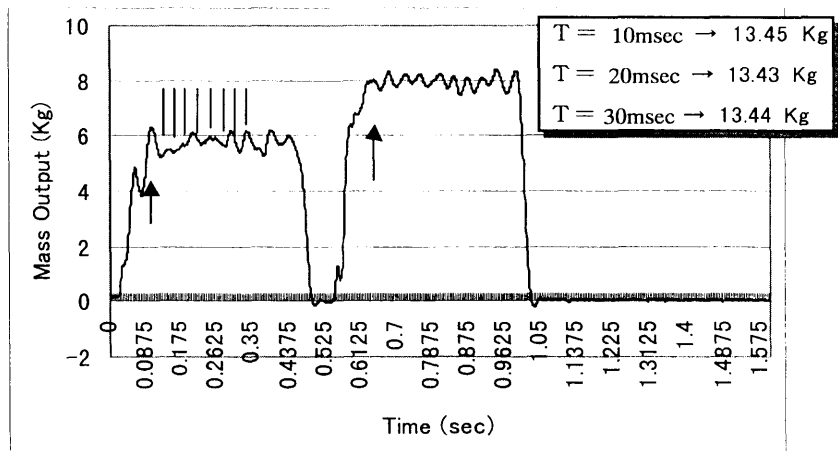


Fig. 4 走行車両の時間経過と質量出力信号

7. 文献

- (1)池田・小野・青木, 計測自動制御学会論文集, 28-1, (1992)50-58

謝辞

この研究を始めるに当たって、多くの資料を提供していただいた元龍谷大学理工学部教授、元神戸大学教授、中川隆夫先生および元龍谷大学大学院生、中村克彦君に感謝する。

